干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

甘肃省水资源生态足迹和生态承载力时空特征

李 菲， 张小平

（西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：基于水资源生态足迹模型，核算了甘肃全省及14个市（州）2003—2017年的水资源生态足迹和生态承载力，在此基础上计算出其生态盈亏和生态足迹强度，并对其时空变化特征进行分析。结果表明：(1) 2003—2017年甘肃省水资源生态足迹远大于生态承载力，导致水资源处于生态赤字状态，但水资源生态足迹总体上呈缓慢下降趋势，水资源生态承载力呈波动上升态势，生态赤字的变化趋势与生态承载力基本一致，而水资源生态足迹强度呈逐年下降趋势，说明甘肃省水资源利用效率不断提高，供需矛盾有所缓解；(2) 生产用水尤其是农业用水是最大的足迹账户，且呈下降趋势；生态用水足迹虽然占比很低，但呈快速增长态势，用水结构趋向合理；(3) 水资源生态足迹的区域差异明显，整体上呈现从西北向东南递减的分布趋势。水资源生态足迹强度的区域差异也较大，但呈缩小的态势；(4) 水资源生态承载力的区域差异也十分显著，其高水平区和较高水平区空间分布相对稳定，呈现出向低值区发展的趋势；(5) 水土资源匹配不合理，土地资源少而分散的甘南高原和陇南山地水资源生态盈余较大，而土地资源丰富的河西地区水资源生态赤字严重。

关 键 词：水资源；生态足迹；生态承载力；时空特征；甘肃省

文章编号：

水资源是指可资利用或有可能被利用的水源，是人类赖以生存的基础。随着经济的不断发展，人口的持续增加，生活水平的逐步提高，对水资源的需求越来越大，导致水资源短缺、水质下降、水源污染等问题日趋严峻[1-2]。因此，厘清水资源的时空分布，掌握其开发利用现状，针对不同地区合理规划和管控水资源，成为区域可持续发展亟需解决的迫切问题，已引起了学术界的普遍关注。由于生态足迹模型能够定量评价人类对资源的需求及区域可持续发展的程度而被广泛应用在资源、经济和生态等领域[3-4]。该模型通过核算维持人类生存的自然资源消费量和由此产生的废弃物排放量所需要的生态生产力的地域面积来衡量区域的可持续发展状况[5-8]，其生态生产力的地域面积包括化石能源地、可耕地、牧草地、林地、建筑用地和水域等6类生产型用地，但将水域的生物生产功能仅仅以渔业生产来概括，忽视了水资源在其他生产领域以及生活和生态环境方面的用途，从而大大缩小了水资源的功能范围[9-11]。为克服其不足，黄林楠等根据用水特性，将全部用水账户分为生产用水、生活用水和生态用水三大类，在此基础上建立了水资源生态足迹模型[10]。此后学者们相继展开了不同尺度、不同区域的实证研究，成果主要集中在经济较为发达的湿润半湿润地区[10-15]，而对经济相对落后的干旱半干旱地区水资源生态足迹的测算和分析还较少[16-17]。

甘肃省地处我国西北干旱区、青藏高原区和东部季风区等三大自然区的交汇地带，是我国缺水最严重的省份之一，多年平均水资源量为$2.20×10^{10}$ m^3，人均可供水量为123.17 m^3。其水资源主要分属黄河流域、长江流域和内陆河流域，境内年降水量较少且多集中在夏秋季节，多年平均降水量277 mm，仅为全国年平均降水量的43%，总体变化趋势是从

收稿日期：2019-11-17； **修订日期**：2020-01-01
基金项目：国家自然科学基金（41161028）
作者简介：李菲（1995-），女，甘肃武威人，硕士研究生，主要从事区域环境与生态产业研究. E-mail: 1179465165@qq.com
通信作者：张小平（1967-），女，甘肃会宁人，教授，硕士生导师，主要从事区域环境与生态产业研究. E-mail: zxp296@163.com

西北向东南递增，地区间年降水量差异较为显著且水土资源匹配性差[18-19]。近年来，随着经济的发展和人口的持续增长，对水资源的需求不断增加，但水资源的开发利用率还较低，浪费现象严重，加之用水结构不合理，使甘肃省的水资源供需矛盾不断加大，对生态文明经济发展的制约越来越明显[20]。当前，水资源已成为限制全省农业经济发展的首要因子，改善水资源生态环境以缓解现阶段社会主要矛盾已成为此领域的研究热点[21-22]。因此，本文以甘肃省为研究对象，基于水资源生态足迹模型，核算有生态用水数据以来（2003—2017年）甘肃全省及14个市（州）的水资源生态足迹和生态承载力，在此基础上计算出其生态盈亏和生态足迹强度，并对其时空变化特征和可持续利用状态进行了分析，以期为甘肃省水资源的合理利用和科学管理提供依据。

1　研究方法与数据来源

1.1　水资源生态足迹

为全面刻画甘肃省水资源生态足迹，根据用水特性将全部用水分为生产用水、生活用水和生态用水三大类[23]。为方便分类比较，根据甘肃省水资源公报统计口径，进一步将生产用水分为农业用水（含农田灌溉用水和林牧渔畜用水）、工业用水和城镇公共用水（含建筑业用水和服务业用水）；生活用水分为城镇居民生活用水和农村居民生活用水；生态用水分为城镇环境用水和农村生态用水。各类用水足迹的计算公式如下：

$$EF_w = N \times ef_w = \alpha_w \times \left(W_w / \beta_w \right) \qquad (1)$$

式中：EF_w 为水资源生态足迹（hm^2）；N 为人口数量（人）；ef_w 为人均水资源生态足迹（$hm^2 \cdot$人$^{-1}$）；α_w 为全球水资源均衡因子；W_w 为用水总量（m^3）；β_w 为全球水资源平均生产能力（3 140 $m^3 \cdot hm^{-2}$）。

1.2　水资源生态承载力

基于生态足迹模型的水资源承载力兼具自然属性、社会属性以及空间属性，为某一区域在某一具体的发展阶段和科技、文化、管理水平下，水资源对生态系统和经济系统良性发展的支撑能力[23]。为了维护生态环境和生物多样性，一个国家或地区的水资源开发利用率不可能达到100%，在计算水资源承载力时至少要扣除60%用于维持生态系统的平衡[24]。因此在其具体计算中要加上水资源合理开发利用系数0.4。则其表达式为：

$$EC_w = N \times ec_w = 0.4 \times \delta \times \alpha_w \times \left(Z / \beta_w \right) \qquad (2)$$

式中：EC_w 为水资源生态承载力（hm^2）；N 为人口数量（人）；ec_w 为人均水资源生态承载力（$hm^2 \cdot$人$^{-1}$）；α_w 为全球水资源均衡因子；δ 为水资源产量因子；Z 为水资源总量（m^3）；β_w 为全球水资源平均生产能力（3 140 $m^3 \cdot hm^{-2}$）。

1.3　水资源生态盈亏

水资源生态盈亏（ED_w）是区域内水资源生态承载力与生态足迹的差值，可用来判断区域的水资源可持续利用情况。计算公式如下：

$$ED_w = EF_w - EC_w \qquad (3)$$

$ED_w > 0$ 表示该区域水资源生态盈余，处于可持续利用状态；$ED_w < 0$ 表示该区域为水资源生态赤字，水资源不足以支持区域社会经济发展的需求。

1.4　水资源生态足迹强度

利用单位 *GDP* 的水资源生态足迹来表示生态足迹强度（ES_w），以此衡量区域内水资源的利用效率，其值越小表示该区域水资源利用效率越高，反之亦然。计算公式如下：

$$ES_w = \frac{EF_w}{GDP} \qquad (4)$$

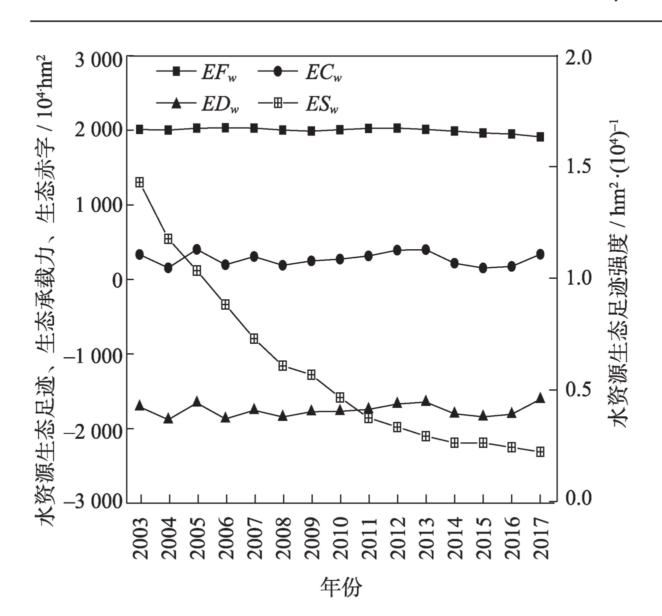
1.5　数据来源

水资源总量、用水量来自2003—2017年的《甘肃省水资源公报》，人口、地区生产总值等数据来自2004—2018年的《甘肃省发展年鉴》，水资源产量因子为甘肃省及各市（州）水资源平均生产能力与世界水资源平均生产能力的比值，水资源全球均衡因子选取世界自然基金会2002年（WWF）的核算值5.19，水资源全球平均生产能力参考相关研究结果[23]确定为3 140 $m^3 \cdot hm^{-2}$。

2　结果与分析

2.1　水资源生态足迹和生态承载力的动态变化

根据公式（1）~（4）对2003—2017年甘肃省的水资源生态足迹、生态承载力进行了核算，在此基础上计算出其生态盈亏和生态足迹强度。结果表明（图1），水资源生态足迹远大于生态承载力，导致水资源处于较大的生态赤字状态。就其变化而言，水资源生态足迹总体上呈缓慢下降趋势，从2003年



注：EF_w、EC_w、ED_w、ES_w分别表示水资源生态足迹、生态承载力、生态盈亏、生态足迹强度

图1 甘肃省水资源生态足迹、生态承载力及生态赤字的变化趋势

Fig. 1 Changing trend of ecological footprint, ecological carrying capacity and ecological deficit of water resources in Gansu Province

的2 015.98×10^4 hm²下降到2017年的1 918.32×10^4 hm²，下降幅度为4.84%。水资源生态承载力呈波动上升态势，从2003年的362.08×10^4 hm²上升到2017年365.38×10^4hm²，增长幅度较小，仅为0.91%。水资源生态赤字呈波动下降态势，从2003年的−1 653.90×10^4 hm²下降到2017年的−1 552.94×10^4 hm²，下降幅度为6.10%，其变化趋势与水资源承载力基本一致，说明其受水资源生态承载力变化的影响较大，水资源供需矛盾有所缓解。水资源生态足迹强度呈逐年下降趋势，从2003年的1.44 hm²·(10^4 元)⁻¹持续下降到2017年的0.25 hm²·(10^4 元)⁻¹，降幅高达82.65%。表明甘肃省水资源利用效率在不断提高。

从水资源生态足迹构成来看(图2a)，生产用水是最大的足迹账户，其平均占比高达90%以上，生活用水和生态用水足迹平均占比分别为5.07%和2.18%，说明甘肃省节水的重点在于生产领域，而且节水的潜力较大。就其变化而言，生产用水和生活用水足迹呈波动下降态势，分别从2003年的1 914.66×10^4 hm²和97.79×10^4 hm²下降到2017年的1 751×10^4 hm²和89.27×10^4 hm²，下降幅度分别为8.55%、8.71%。生态用水足迹呈波动上升态势，由2005年(2003年、2004年的农村生态用水数据缺失)的50.84×10^4 hm²上升到2017年的78.05×10^4 hm²，增长幅度高达53.52%。三大用水足迹变化的结果导致其所占比重也发生了明显变化。生产用水足迹、生活用水足迹和生态用水足迹所占比重分别由2005年的92.46%、5.04%、2.50%变为2017年的91.28%、4.65%、4.07%。可以看出，生产用水是甘肃省水资源生态足迹的主要账户，且呈下降趋势；生态用水足迹虽然占比很低，但呈快速增长态势，用水结构逐渐趋向合理。

在生产用水足迹中(图2b)，农业用水足迹所占比重最大，平均占比为85.88%，但呈波动下降态势，从2003年1 611.59×10^4 hm²下降到2017年的1 525.61×10^4 hm²，下降幅度为5.33%。其中以农田灌溉用水足迹为主，林牧渔畜用水足迹为辅，分别占92.73%、7.27%。不过农田灌溉用水足迹呈波动下降态势，从2003年的1 478.85×10^4 hm²下降到2017年的1 376.71×10^4 hm²，下降了6.91%。而林牧渔畜用水足迹呈波动上升趋势，从2003年的132.74 ×10^4 hm²上升到2017年的148.90 ×10^4 hm²，增长幅度为12.18%；其次是工业用水足迹，平均占比为12.11%，也呈波动下降态势，从2003年的277.01×10^4 hm²下降到2017年的171.08×10^4 hm²，下降幅度较大(38.24%)；城镇公共用水足迹所占比重小，平均占比仅为2.01%，但增长态势明显，从2003年26.06×10^4 hm²上升到2017年的54.31×10^4 hm²，增幅高达108.40%。其中建筑业用水足迹从2003年的14.71×10^4 hm²波动上升到2012年的18.66×10^4 hm²后“断崖式”下降到2017年的1.86×10^4 hm²，下降幅度为90.03%，总体下降了87.33%。而服务业用水足迹则呈增长态势，先从2003年的11.35×10^4 hm²缓慢增长到2012年的14.30×10^4 hm²后迅速上升到2017年的52.44×10^4 hm²，增长率分别为25.60%、266.71%，总体增长了362.18%，可以看出服务业用水增长是导致城镇公共用水足迹上升的主要因素。

在生活用水足迹中(图2c)，城镇居民和农村居民用水足迹变化差异较大。2003—2008年间，城镇居民和农村居民用水足迹都呈缓慢增长态势，分别由49.59×10^4 hm²、48.19×10^4 hm²增长到53.64×10^4 hm²、53.73×10^4 hm²，其平均占比分别为50%左右；2008年以后，城镇居民用水足迹快速增长到2012年的69.63×10^4 hm²后又快速下降到2013年的47.70×10^4 hm²，然后又逐渐上升到2017年的56.00×10^4

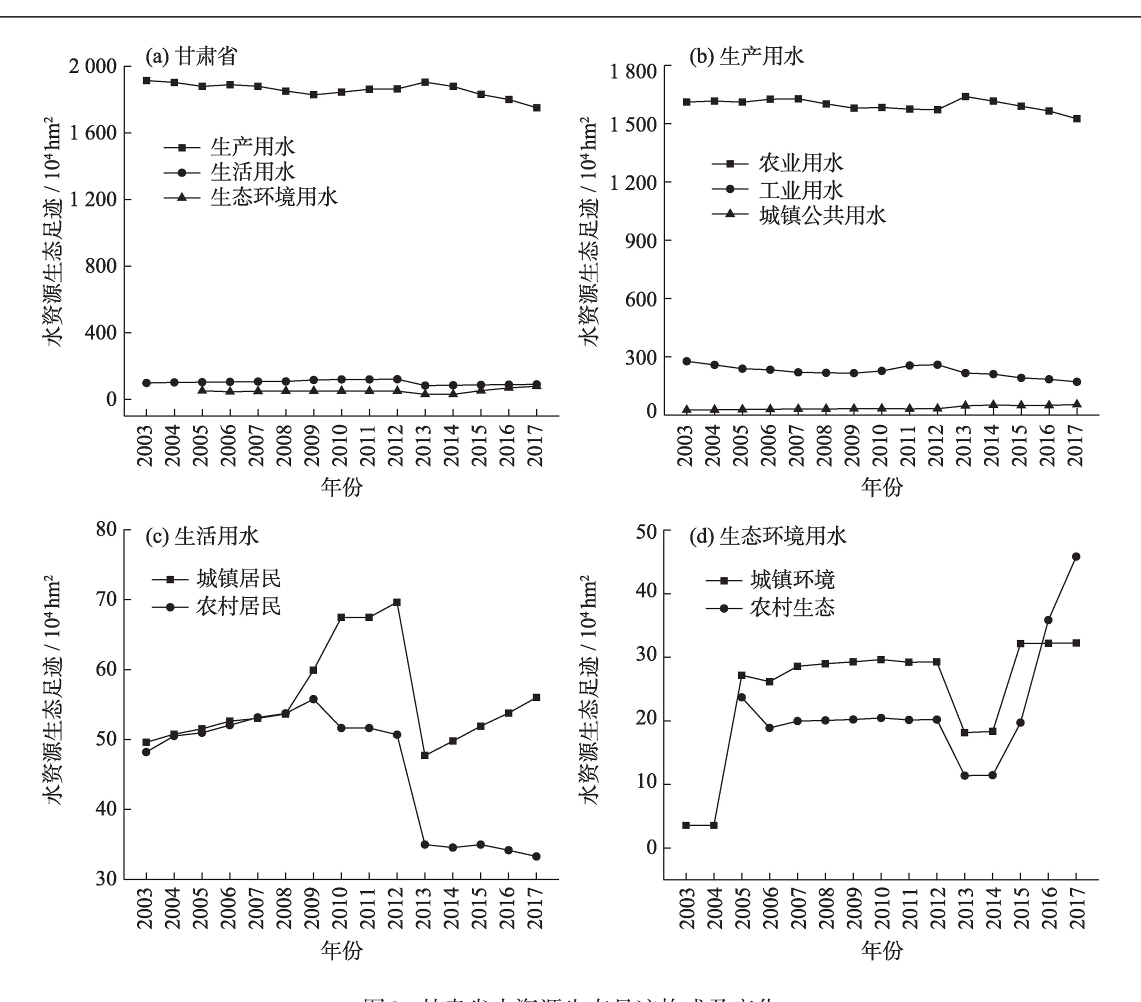


图2　甘肃省水资源生态足迹构成及变化

Fig. 2　Composition and changes of ecological footprint of water resources in Gansu Province

hm², 整体变化趋势呈"N"型；而农村居民用水足迹继续增长到2009年的55.77×10⁴ hm²后呈阶梯式下降态势，经过快速—缓慢—快速—缓慢的下降过程后达到2017年的最小值(33.27×10⁴ hm²)。城镇居民和农村居民用水足迹的变化差异导致其占比在2008年以后发生分异，分别由各占50%左右变化为2017年的62.73%和37.27%，使城镇居民用水足迹明显高于农村居民。这主要是由于2008年以后甘肃省进入快速城镇化阶段，城镇化水平由2003年的27.38%缓慢增长到2008年的32.15%以后快速增长到2017年的46.39%，使城镇人口持续增加而农村人口不断减少。同时，城镇生活用水定额普遍高于农村，导致城镇居民用水足迹明显高于农村居民而且呈扩大趋势。

在生态用水足迹中(图2d)，城镇环境和农村生态用水足迹整体上都呈波动上升趋势，但农村生态用水足迹变化幅度较大，使两者占比由2016年以前以城镇环境用水足迹为主变为2016年及以后以农村生态用水足迹为主的局面。说明甘肃省近年来在大力改善城镇生态环境的同时加强了农村生态环境的建设力度，使其生态环境用水在2014年以前经历了波动下降后快速上升。

2.2　水资源生态足迹和生态承载力的区域差异

2.2.1　水资源生态足迹的区域差异　甘肃省水资源生态足迹区域差异十分明显(图3)。从2003年、2010年和2017年3个时间节点上看，酒泉市、张掖市和武威市的人均水资源生态足迹总体较大，其中酒泉市的人均水资源生态足迹分别为4.89 hm²·人⁻¹、3.59 hm²·人⁻¹和4.01 hm²·人⁻¹，均为全省最大；而定西市、天水市、平凉市、庆阳市、陇南市、临夏州和甘南州的人均水资源生态足迹总体较小，其中在2003年和2010年甘南州的人均水资源生态足迹最小，而2017年陇南市的人均水资源生态足迹最小，均为0.12 hm²·人⁻¹。

就其变化而言，与2003年相比，2017年人均水资源生态足迹增长的地区只有嘉峪关市、金昌市和

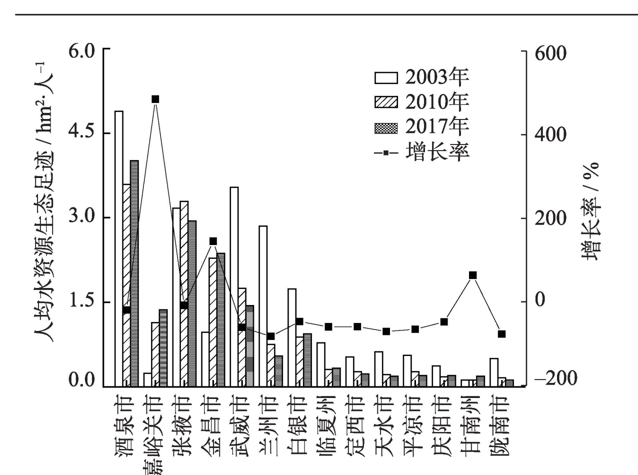


图3 甘肃省各市(州)水资源生态足迹变化

Fig. 3 Changes of ecological footprint of water resources in cities (prefectures) of Gansu Province

甘南州，分别增长了480.24%、144.32%和64.09%，其它地区均呈下降态势，其中下降幅度最大的是兰州市，下降了80.52%，其次为陇南市，下降了75.02%。

从水资源生态足迹强度来看(图4)，各地区差异较大，不过其差距呈缩小态势。水资源生态足迹强度较大的地区为酒泉市、张掖市和武威市，较小的地区为嘉峪关市、兰州市、定西市、天水市、平凉市、庆阳市和甘南州等。2003年水资源生态足迹强度最大的酒泉市[4.43 $hm^2\cdot(10^4元)^{-1}$]与最小的庆阳市[0.40 $hm^2\cdot(10^4元)^{-1}$]之间的差值为[4.03 $hm^2\cdot(10^4元)^{-1}$]，2010年水资源生态足迹强度最大的张掖市[1.86 $hm^2\cdot(10^4元)^{-1}$]与最小的庆阳市[0.11 $hm^2\cdot(10^4元)^{-1}$]之间的差值为1.75 $hm^2\cdot(10^4元)^{-1}$，到2017年水资源生态足迹强度最大的张掖市[0.89 $hm^2\cdot(10^4元)^{-1}$]与最小的庆阳市[0.07 $hm^2\cdot(10^4元)^{-1}$]之间的差值变为0.82 $hm^2\cdot(10^4元)^{-1}$。由此可见，在2003—2017年间，水资源生态足迹强度的区域差异越来越小。这主要与甘肃省各地区水资源生态足迹强度普遍大幅下降有关，大多数地区降幅在80%以上。其中，降幅最小的金昌市为71.36%，降幅最大的陇南市达到90.11%。进一步分析发现，水资源生态足迹强度较大的地区与人均水资源生态足迹较大的地区基本一致，主要位于河西走廊地区，是全省重要的粮食种植基地，但由于降水较少，农业种植主要依赖灌溉，使农业用水量占比高达90%左右。同时，由于农业用水方式普遍较粗放，加之缺乏有效的用水管理，导致水资源利用效率不高。而水资源生态足迹强度较小的地区如嘉峪关市、兰州市、定西市、庆阳市等，农业用水占比普遍较低，工业用水和城镇公共用水占比较高。一般而言，工业用水和城镇公共用水效率普遍高于农业用水效率，使得水资源足迹强度较低。总体而言，随着全省产业结构的转型升级以及节水技术的不断改进，各地区的水资源利用效率均有不同程度的提高。

2.2.2 水资源生态承载力的区域差异 甘肃省水资源生态承载力的区域差异也十分明显(图5)。总体而言，甘南州和陇南市的人均水资源生态承载力较大。在2003年、2010年和2017年的平均值分别为4.91×10^4 $hm^2\cdot人^{-1}$和1.56×10^4 $hm^2\cdot人^{-1}$，而嘉峪关市、金昌市 、兰州市、白银市等工业城市的人均水资源生态承载力较低，其中最小的是嘉峪关市，在2003

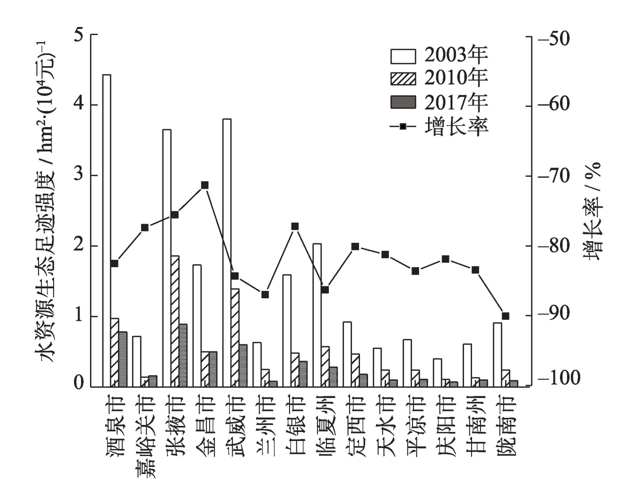


图4 甘肃省各市(州)水资源生态足迹强度变化

Fig. 4 Changes of ecological footprint intensity of water resources in the cities (prefectures) of Gansu Province

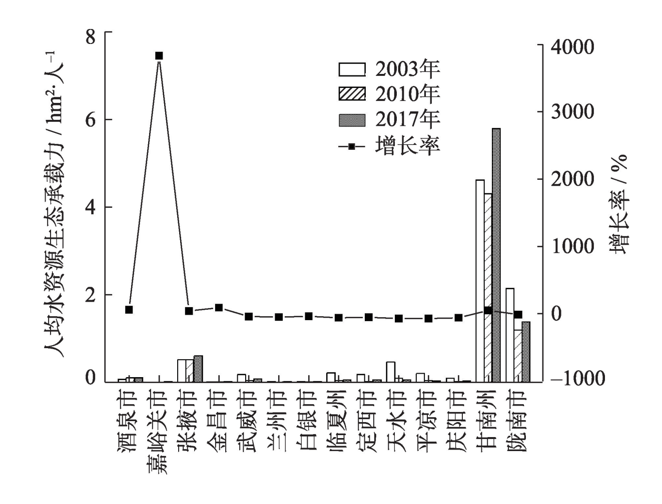


图5 甘肃省各市(州)水资源生态承载力变化

Fig. 5 Changes of ecological carrying capacity of water resources in cities (prefectures) of Gansu Province

年、2010年和2017年的平均值仅为$2.27×10^{-4}$ $hm^2·人^{-1}$。造成水资源生态承载力区域差异明显的原因主要与各地区的降水量有直接的关系。分析发现，甘南州、陇南市的降水量、产水系数、产水模数在研究期间普遍高于其它区域，而嘉峪关市的降水量、产水系数、产水模数历年来均为最小值。

就其变化而言，2003—2017年间，全省各地的人均水资源生态承载力均有不同程度的变化。人均水资源生态承载力上升的地区为酒泉市、嘉峪关市、张掖市、金昌市和甘南州，其中上升幅度最大的是嘉峪关市，上升幅度高达3 658.98%，其余9个地区的人均水资源生态承载力则呈下降态势，下降幅度最大的是平凉市，其次是天水市，分别下降了91.94%，91.78%。总体来说，受降水量和人口数量变化的影响，各个地区的人均水资源生态承载力均有不同程度的变化。

2.2.3　水资源生态盈亏的区域差异　各个地区水资源生态足迹和生态承载力的差异及变化导致了其生态盈亏的不同及变化。2003—2017年间，仅甘南州和陇南市的水资源呈盈余状态(图6)，水资源较丰富，开发利用的潜力较大，其余12个地区的水资源均呈赤字状态，其中酒泉市、张掖市和武威市的水资源生态赤字一直较高，水资源与区域社会经济发展的矛盾突出。进一步分析发现，水资源生态盈余的地区总体降水量较多，土地资源少而分散，而水资源生态赤字较大的地区总体降水稀少，土地资源丰富，农业用水占比高。就其变化而言，甘南州的水资源生态盈余下降了7.56%，而陇南市的则上升了107.01%；嘉峪关市等8个地区的水资源生态赤字均有不同程度的增加，其中增幅较大的是天水市和嘉峪关市，增幅分别为240.44%和49.99%，而酒泉市等4个地区的水资源生态赤字则均呈下降态势，其中降幅较大的是兰州市和武威市，分别下降了24.92%、22.81%。

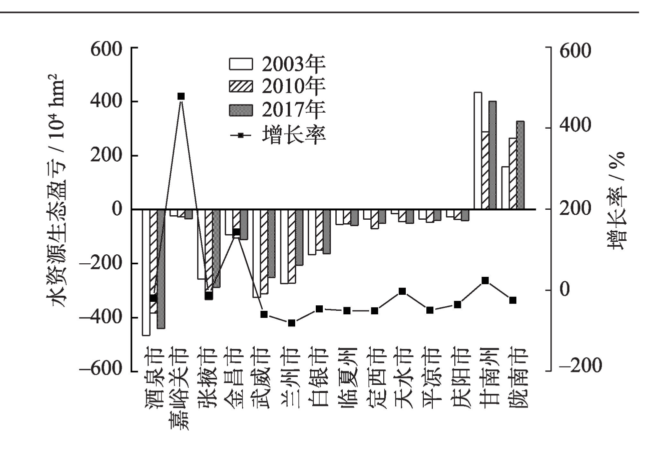


图6　甘肃省各市(州)水资源生态盈亏变化

Fig. 6　Changes of ecological surplus and deficit of water resources in cities (prefectures) of Gansu Province

2.3　水资源生态足迹和生态承载力的空间分布

为了更直观地反映甘肃省水资源生态足迹和生态承载力的空间分布特征，基于2003年、2010年和2017年的人均水资源生态足迹和生态承载力数据，利用ArcGIS软件，采用自然段点法将14个市(州)划分为5个类型区，分别为高水平区、较高水平区、中等水平区、较低水平区和低水平区。

2.3.1　水资源生态足迹的空间分布　2003—2017年间，全省人均水资源生态足迹空间分布格局发生了较大幅度的变化(图7)。人均水资源生态足迹高水平区数量减少，由2003年的4个(酒泉、张掖、武威和兰州)减少到2010的2个(酒泉和张掖)，2017年其数量和地区未发生改变；人均水资源生态足迹较

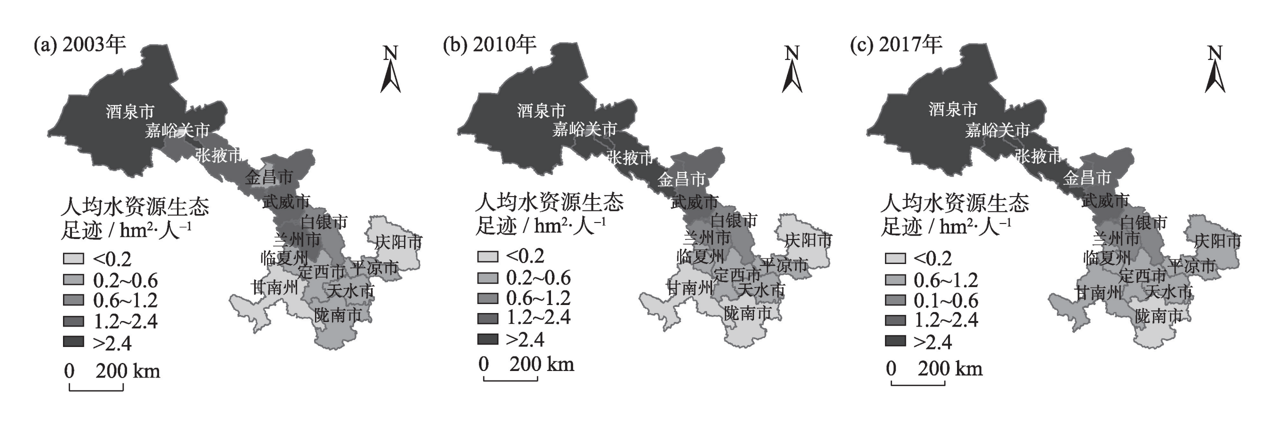


图7　2003—2017年甘肃省水资源生态足迹空间分布

Fig. 7　Spatial distribution of ecological footprint of water resources in Gansu Province from 2003 to 2017

高水平区数量增加，由2003年的1个（白银）增加到2010年的2个（金昌、武威），进一步增加到2017年的3个（金昌、武威和嘉峪关）；人均水资源生态足迹中等水平区从2003年到2010年虽然数量不变，但具体地区发生了变化，由金昌市、临夏州和天水市变为嘉峪关市、兰州市和白银市，到2017年减少为1个（白银市）；人均水资源生态足迹较低水平区数量和地区都发生了变化，由2003年的5个（嘉峪关、定西、平凉、庆阳和陇南）变为2010年的4个（定西、平凉、临夏和天水），2017年又变为4个（定西、平凉、临夏和兰州）；人均水资源生态足迹低水平区数量和地区也都发生了变化，由2003年的1个（甘南）增加到2010年的3个（甘南、陇南和庆阳），进一步增加到2017年的4个（甘南、陇南、庆阳和天水）。

总体上，人均水资源生态足迹高水平区数量较少且呈减少趋势，而人均水资源生态足迹低水平区数量较多且呈增长趋势，使全省人均水资源生态足迹呈现出向低值区发展的趋势。人均水资源生态足迹高水平区和较高水平区空间分布相对较为稳定，集中分布在河西走廊和陇中地区，而人均水资源生态足迹低水平区和较低水平区空间分布上的集聚现象明显，主要分布在甘南高原、陇南山地、陇东南和陇东地区，整体上呈现从西北向东南递减的分布趋势。

2.3.2 水资源生态承载力的空间分布 2003—2017年间，全省人均水资源生态承载力高水平区和较高水平区一直未发生变化，分别为甘南州和陇南市，其他3个等级的类型区发生了较为明显的变化（图8）。人均水资源生态承载力中等水平区由2003年的7个（张掖市、武威市、临夏州、天水市、平凉市、庆阳市和定西市）减少到2010年和2017年的1个（张掖市）；人均水资源生态承载力较低区由2003年的1个（酒泉市）增加到2010年的5个（酒泉市、武威市、临夏州、天水市和平凉市），2017年其数量未发生改变，但地区发生了变化（酒泉市、武威市、临夏州、天水市和定西市）；人均水资源生态承载力低水平区由2003年的4个（嘉峪关市、金昌市、兰州市和白银市）增加到2010年的6个（嘉峪关市、金昌市、兰州市、白银市、定西市和庆阳市），2017年其数量未发生改变，但地区发生了变化（嘉峪关市、金昌市、兰州市、白银市、平凉市和庆阳市）。

总体上人均水资源生态承载力高水平区和较高水平区数量少且空间分布稳定，分布在陇东南地区，而低水平区及较低水平区数量呈增加态势，使全省人均水资源生态承载力呈现出向低值区发展的趋势，但空间分布较分散，主要分布在河西走廊和陇中地区。说明随着全省社会经济的发展，大部分地区水资源较缺乏且缺水地区越来越多。这种空间分布导致水资源供需不平衡，增加了水资源开发利用的难度，不利于全省水资源的空间调配和有效管理。

3 结论与建议

水资源生态足迹和生态承载力的核算有助于认清区域水资源的可持续利用状况。本文基于水资源生态足迹模型，核算了甘肃全省的水资源生态足迹和生态承载力，以及生态盈亏和生态足迹强度，并对其时空特征和可持续利用现状进行分析和评价。得到以下结论：

（1）2003—2017年甘肃省水资源生态足迹远大

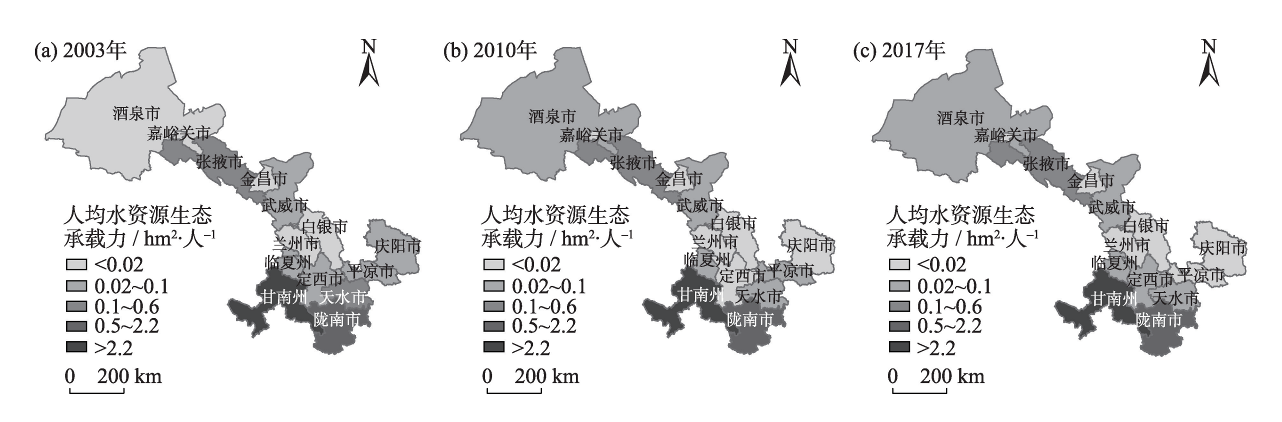


图8 2003—2017年甘肃省水资源生态承载力空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of ecological carrying capacity of water resources in Gansu Province from 2003 to 2017

于生态承载力，导致水资源处于生态赤字状态，对社会经济发展的限制较大。但水资源生态足迹总体上呈缓慢下降趋势，水资源生态承载力呈波动上升态势，生态赤字的变化趋势与生态承载力基本一致，而水资源生态足迹强度呈逐年下降趋势，说明甘肃省水资源利用效率不断提高，供需矛盾有所缓解；

（2）生产用水尤其是农业用水是最大的足迹账户，且呈下降趋势，而生态用水足迹虽然占比很低，但呈快速增长态势，用水结构趋向合理；

（3）水资源生态足迹的区域差异明显，整体上呈现从西北向东南递减的分布趋势。水资源生态足迹强度的区域差异也较大，但呈现缩小的态势；

（4）水资源生态承载力的区域差异也十分显著，其高水平区和较高水平区空间分布稳定，整体呈现出向低值区发展的趋势；

（5）水资源与土地、生产力布局不相匹配，经济较为落后，土地资源少而分散的甘南高原和陇南山地水资源生态盈余较大，而土地资源丰富的河西地区或经济较为发达的工业地区水资源生态赤字严重。

可以看出，甘肃省水资源生态赤字严重，时空分布不平衡，已成为社会经济发展中亟待解决的迫切问题。为了促进全省社会经济的持续发展，必须解决水资源的短缺和空间分布不平衡的问题。首先，应加大水利工程设施的建设力度。通过建设蓄水、引水、提水和跨流域调水等水利工程来解决水资源的时空分布不均问题，以提高全省水资源的调蓄能力和综合管理水平，使有限的水资源得到高效开发利用；其次，积极推广和运用新型节水技术。农业用水是甘肃省最大的足迹账户，也无疑是节水的重点领域。要通过调整种植结构，逐渐降低耗水较大的农作物种植面积和比例，积极推广利用节水技术，大力发展节水型农业，提高水资源的利用效率。工业要通过清洁生产、中水利用、工艺流程改进及内部结构的调整，节能降耗，不断提高工业用水效率。随着社会经济的发展，城市化水平的进一步提高，甘肃省城镇生活用水和服务业用水还会大幅增长，应提高公众的节水意识，通过管理、技术和经济等手段促进节水型社会建设；第三，加大污水处理回用率。随着甘肃省城市化水平的提高，城市生活污水大幅增长，应通过集中处理，严格控制水质等措施提高污水在绿化、地面冲洗、农田灌溉、河道补水等方面的回用率，以增加供水量；同时通过植树造林改善生态环境来提高各个地区尤其是河西地区和中部地区的水资源承载力。

参考文献（References）

[1] 胡雪萍, 李丹青. 城镇化进程中生态足迹的动态变化及影响因素分析: 以安徽省为例[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(2): 300−306. [HU Xueping, LI Danqing. A study on ecological footprint’s dynamic change and influence factors in the progress of new pattern urbanizatoin: A case of Anhui Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(2): 300−306.]

[2] 刘楚烨, 赵言文, 马群宇, 等. 基于水足迹理论的江苏省水资源可持续利用评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 313−320. [LIU Chuye, ZHAO Yanwen, MA Qunyu, et al. Evaluation of sustainable utilization of water resources in Jiangsu Province based on water footprint theory[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 313−320.]

[3] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out[J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121−130.

[4] VOET E. Books: Our ecological footprint: reducing human impact on the earth[J]. Journal of Industrial Ecology, 1999, 3(2−3): 185−187.

[5] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Globalization of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade[J]. Global Environmental Change, 2005, 15(1): 45−56.

[6] GALLI A, WIEDMANN T, ERCIN E, et al. Integrating ecological, carbon and water footprint into a “Footprint Family” of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet[J]. Ecological Indicators, 2012, 16: 0−112.

[7] 周悦, 谢屹. 基于生态足迹模型的辽宁省水资源可持续利用分析[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3157−3163. [ZHOU Yue, XIE Yi. Analysis of sustainable utilization of water resource in Liaoning Province based on ecological footprint model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(11): 3157−3163.]

[8] 范晓秋. 水资源生态足迹研究与应用[D]. 南京: 河海大学, 2005. [FAN Xiaoqiu. Study on the principle of water resources ecological footprint and application in Jiangsu Province[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.]

[9] 王文国, 何明雄, 潘科, 等. 四川省水资源生态足迹与生态承载力的时空分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1555−1565. [WANG Wenguo, HE Mingxiong, PAN Ke, et al. Analysis of spatio-temporal characteristics of water resources ecological footprint and ecological carrying capacity in Sichuan Province[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(9): 1555−1565.]

[10] 贾陈忠, 乔杨源, 关格格, 等. 山西省水资源生态足迹时空变化特征及驱动因素[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 370−376. [JIA

Chenzhong, QIAO Yangyuan, GUAN Gege, et al. Temporal and spatial variations and the driving factors of water resources ecological footprint in Shanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2): 370-376.]
[11] 王刚毅, 刘杰. 基于改进水生态足迹的水资源环境与经济发展协调性评价——以中原城市群为例[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(1): 80-90. [WANG Gangyi, LIU Jie. Coordinating evaluation of water resources environment and economic development based on improved water ecological footprint: A case study of central plains urban agglomeration[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(1): 80-90.]
[12] 杨志远, 杨建, 杨秀春. 典型喀斯特城市水资源利用与经济发展关系分析: 以铜仁市为例[J]. 经济地理, 2018, 38(9): 105-113. [YANG Zhiyuan, YANG Jian, YANG Xiuchun. Analysis of water use and economic development in typical Karst cities: A case study of Tongren City[J]. Economic Geography, 2018, 38(9): 105-113.]
[13] 赵静, 王颖, 赵春子, 等. 延边州水资源生态足迹与承载力动态研究[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(12): 74-82. [ZHAO Jing, WANG Ying, ZHAO Chunzi, et al. Dynamic research on the ecological footprint and load-carrying capacity of water resources in Yanbian area[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(12): 74-82.]
[14] 熊娜娜, 谢世友. 成都市水资源生态足迹及承载力时空演变研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(5): 1016-1025. [XIONG Nana, XIE Shiyou. A study of the spatio-temporal evolution of water resource ecological footprint and ecological carrying capacity of Chengdu[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2018, 40(5): 1016-1025.]
[15] 程超, 童绍玉, 彭海英, 等. 滇中城市群水资源生态承载力的平衡性研究[J]. 资源科学, 2016, 38(8): 1561-1571. [CHENG Chao, TONG Shaoyu, PENG Haiying, et al. Ecological carrying capacity of water resources in the central Yunnan urban agglomeration area [J]. Resources Science, 2016, 38(8): 1561-1571.]
[16] 雷亚君, 张永福, 张敏惠, 等. 新疆水资源生态足迹核算与预测[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(5): 142-150. [LEI Yajun, ZHANG Yongfu, ZHANG Minhui, et al. Calculation and prediction of water resource ecological footprint in Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(5): 142-150.]
[17] 孟丽红, 叶志平, 袁素芬, 等. 江西省2007—2011年水资源生态足迹和生态承载力动态特征[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 256-261. [MENG Lihong, YE Zhiping, YUAN Sufen, et al. Dynamic characteristics of ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Jiangxi Province during 2007—2011[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1): 256-261.]
[18] 曹博, 张勃, 马彬, 等. 2000—2014年甘肃省NDVI时空变化特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(2): 418-427. [CAO Bo, ZHANG Bo, MA Bin, et al. Spatial and temporal variations of NDVI in Gansu, China from 2000 to 2014[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38 (2): 418-427.]
[19] 甘肃省水利厅. 甘肃省水资源公报[EB/OL]. [2017-11-13]. http: //www. gssl. gov. cn/. [Department of Water Resources of Gansu Province. Water resources bulletin of Gansu Province[EB/OL]. [2017-11-13]. http: //www. gssl. gov. cn/.]
[20] 雒占福, 张金, 刘娅婷, 等. 2000—2017年中国城市绿化水平的时空演变及其影响因素研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 481-490. [LUO Zhanfu, ZHANG Jin, LIU Yating, et al. Spatiotemporal evolution of urban greening in China and the affecting factors between 2000 and 2017[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 481-490.]
[21] 张华, 王浩. 1967—2017年甘肃省小麦需水量和缺水量时空特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(5): 1094-1104. [ZHANG Hua, WANG Hao. Spatial and temporal characteristics of water requirement and water deficit of wheat in Gansu Province from 1967 to 2017 [J]. Arid Land Geography, 2019, 42(5): 1094-1104.]
[22] 赵鸿雁, 陈英, 周翼, 等. 甘肃中东部植被生长季NDVI时空变化及其对气候因子的响应[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1427-1435. [ZHAO Hongyan, CHEN Ying, ZHOU Yi, et al. Spatiotemporal variation of NDVI in vegetation growing season and its responses to climatic factors in mid and eastern Gansu Province from 2008 to 2016[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1427-1435.]
[23] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 等. 水资源生态足迹计算方法[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1279-1286. [HUANG Linnan, ZHANG Weixin, JIANG Cuiling, et al. Ecological footprint method in water resources assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1279-1286.]
[24] 张岳. 中国水资源与可持续发展[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2000: 120-125. [ZHANG Yue. Sustainable utilization of China's water resources[M]. Nanning: Guangxi Science and Technology Publishing House, 2000: 120-125.]

Spatio-temporal characteristics of ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Gansu Province

LI Fei,　ZHANG Xiao-ping

(*College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*)

Abstract: Based on the ecological footprint model of water resources, the ecological footprint and carrying capacity of water resources from 2003 to 2017 in Gansu Province and that of 14 cities (prefectures) in 2003, 2010, and 2017 were calculated. The deficit and intensity of ecological footprint were determined and the characteristics of spatial-temporal evolution were analyzed. The results show as follows: (1) From 2003 to 2017, the ecological footprint of water resources in Gansu Province was much larger than the ecological carrying capacity, which led to the ecological deficit of water resources. However, the ecological footprint of water resources generally showed a slow downward trend, and the ecological carrying capacity of water resources fluctuated and rose. The changing trend of ecological deficit was basically consistent with the ecological carrying capacity. However, the intensity of ecological footprint of water resources showed a downward trend yearly, which indicated that the efficiency of water resources utilization in Gansu Province was constantly improving and that the contradiction between supply and demand was alleviated. (2) Production water, especially agricultural water was the largest footprint account, but it showed a downward trend. Although the proportion of ecological water footprint was very low, it showed a rapid growth trend and the water utilization structure tended to be reasonable. (3) The regional difference of ecological footprint of water resources was obvious, and the distribution trend decreased from northwest to southeast as a whole. The regional difference of ecological footprint intensity of water resources was also large, but it showed a decreasing trend with the change of time. (4) The regional difference of ecological carrying capacity of water resources was also very significant. The spatial distribution of the highest-level area and the higher-level area was stable, and the overall development trend to the low value area was shown. (5) Soil and water resources were not matched reasonably, the economy was relatively backward, and the ecological surplus of water resources in Gannan Plateau and Longnan Mountain with few and scattered land resources was large. However, the ecological deficit of water resources in Hexi area, which was rich in land resources, was serious.

Key words: water resource; ecological footprint; ecosystem carrying capacity; spatial-temporal characteristics; Gansu Province